

R² evaluation between Niño region SSTs (1+2, 3, 3.4, 4) and RAIN4PE monthly precipitation in the Piura River basin

Liñan Olortegui Carlos Alberto¹, Miranda Villarroel Alex Nilsson², Carmona Arteaga Abel, Magister Scientiae en Recursos Hídricos³, Castillo Navarro Leonardo Franco, Magister en Ingeniería Hidráulica con mención en Hidráulica Computacional⁴, Pucha Cofrep Franz Leonardo, Magister Scientiae en Sistemas de Información Geográfica⁵

^{1,2,3,4,5}Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, U202017604@upc.edu.pe, U20201897@upc.edu.pe, pcciacar@upc.edu.pe, pccilcas@upc.edu.pe, fapucha@utpl.edu.ec

Abstract– Sea surface temperature (SST) in the El Niño 1+2 region directly influences precipitation in the Piura River basin, causing variations that can lead to high-impact hydrometeorological events. This study evaluates the statistical relationship between the RAIN4PE product and these variations by analyzing the coefficient of determination (R²) to quantify the explained variance applied to monthly series processed in Google Earth Engine. The results show that RAIN4PE exhibits a significant association with warm El Niño 1+2 conditions, reaching the highest R² values between January and March, and revealing spatial patterns consistent with regional ENSO dynamics. It is concluded that RAIN4PE constitutes a consistent tool for ocean-atmosphere analysis in the Piura River basin and is useful for teleconnection studies and to support climate risk management.

Keywords-- SST; RAIN4PE; precipitation; ENSO; Piura basin.

Evaluación R^2 entre las temperaturas superficiales del mar (SST) de la región de Niño (1+2, 3, 3.4, 4) y las precipitaciones mensuales RAIN4PE en la cuenca del río Piura

Liñan Olortegui Carlos Alberto¹, Miranda Villarroel Alex Nilsson², Carmona Arteaga Abel, Magister Scientiae en Recursos Hídricos³, Castillo Navarro Leonardo Franco, Magister en Ingeniería Hidráulica con mención en Hidráulica Computacional⁴, Pucha Cofrep Franz Leonardo, Magister Scientiae en Sistemas de Información Geográfica⁵

^{1,2,3,4,5}Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, U202017604@upc.edu.pe, U20201897@upc.edu.pe, pcciacar@upc.edu.pe, pccilcas@upc.edu.pe, fapucha@utpl.edu.ec

Resumen– La temperatura superficial del mar (TSM) en la región Niño 1+2 influyen de manera directa en la precipitación de la cuenca del río Piura, generando variaciones que pueden derivar en eventos hidrometeorológicos de alto impacto. Este estudio evalúa la relación estadística del producto RAIN4PE frente a dichas variaciones mediante el análisis del coeficiente de determinación (R^2) para cuantificar la varianza explicada aplicado a series mensuales procesadas en Google Earth Engine. Los resultados muestran que RAIN4PE presenta una asociación significativa ante condiciones cálidas de Niño 1+2, alcanzando los valores más altos de R^2 entre enero y marzo, además de evidenciar patrones espaciales coherentes con la dinámica regional del ENSO. Se concluye que RAIN4PE constituye una herramienta consistente para el análisis océano-atmósfera en la cuenca del río Piura y resulta útil para estudios de teleconexión y apoyo a la gestión del riesgo climático.

Palabras clave– TSM; RAIN4PE; precipitación; ENSO; cuenca Piura.

I. INTRODUCCIÓN

La variabilidad de las precipitaciones en regiones tropicales está estrechamente relacionada con las variaciones de la temperatura superficial del mar (TSM), especialmente aquellas vinculadas al fenómeno El Niño–Oscilación del Sur (ENSO) [1]. Estudios recientes señalan que estas variaciones pueden modificar la convección tropical y reorganizar patrones atmosféricos de gran escala, generando episodios de lluvias extremas o sequías en distintas partes del mundo [2]. La magnitud de estos impactos depende del patrón espacial del calentamiento oceánico y de la respuesta atmosférica asociada, lo cual explica la diversidad de efectos observados entre países y regiones [3].

En el Perú, estas influencias se expresan de forma muy marcada debido a la interacción entre la Temperatura Superficial del Mar (TSM) del Pacífico oriental y la compleja orografía andina. [4]. Las lluvias asociadas a eventos como El Niño pueden producir inundaciones severas, mientras que en otros periodos se observan déficits hídricos importantes [5]. Sin embargo, comprender estos patrones aún representa un desafío no solo por la ausencia de datos in situ, sino por la necesidad de evaluar

la coherencia climática de productos satelitales como RAIN4PE, el cual incorpora correcciones basadas en estaciones del SENAMHI, pero requiere ser analizado frente a forzantes oceánicas como el ENSO para verificar su capacidad de reproducir la señal climática en cuencas de alta variabilidad como la del río Piura [6]. Esta escasez de información afecta directamente la capacidad para generar sistemas de alerta temprana confiables y oportunos [7].

El norte del Perú es una de las regiones más sensibles a estas variaciones climáticas. La intensificación del calentamiento en la región Niño 1+2 suele relacionarse con incrementos abruptos de precipitación, generando desbordes y daños en diferentes cuencas [8]. La magnitud de los impactos del evento El Niño 1997–1998 quedó evidenciada en los extensos desastres registrados en el norte del Perú. Las precipitaciones extraordinarias ocasionaron desbordes de ríos e inundaciones generalizadas, afectando gravemente zonas urbanas y rurales. Como se observa en la figura 1, numerosos centros poblados e infraestructuras resultaron dañados, generando importantes pérdidas económicas y sociales.



Fig.1 Daños hidrológicos y urbanos ocasionados por El Niño 1997–1998

Este escenario evidenció la alta vulnerabilidad del territorio frente a eventos climáticos extremos y la necesidad de fortalecer estrategias de prevención y gestión del riesgo [9]. Estos daños no solo se manifestaron en zonas urbanas consolidadas, sino también en áreas aledañas donde los efectos fueron aún más catastróficos. Un ejemplo representativo es la ciudad de Castilla, ubicada en la región Piura, donde los desbordes e inundaciones anegaron extensas zonas residenciales. Como se observa en la figura 2, numerosas viviendas quedaron completamente rodeadas por el agua, con pérdida de accesos, afectación directa a la infraestructura básica y aislamiento de la población. Este escenario refleja la elevada exposición de asentamientos periurbanos y rurales frente a eventos extremos asociados al fenómeno El Niño [10].



Fig.2 Escenarios de inundación en la ciudad de Castilla durante eventos extremos de El Niño 1997-1998

Dentro de este contexto, la cuenca del río Piura constituye un espacio clave para examinar la relación entre la TSM y la precipitación, ya que combina zonas costeras y sectores de marcada topografía, donde el relieve modula de manera importante la distribución espacial de la lluvia [11].

La influencia orográfica es un aspecto relevante para interpretar estos patrones ya que la presencia de la cordillera de los Andes desempeña un rol fundamental en la distribución espacial e intensidad de las precipitaciones a través del efecto orográfico, actuando como una barrera natural que fuerza el ascenso de las masas de aire húmedo. Este ascenso provoca el enfriamiento del aire y la posterior condensación del vapor de agua, incrementando las precipitaciones en las laderas expuestas. Como resultado, las zonas andinas no solo presentan pendientes más pronunciadas, sino también una mayor concentración de lluvias, lo que intensifica los procesos de escorrentía, erosión y saturación del suelo, aumentando la susceptibilidad a movimientos en masa y otros peligros asociados.

Estudios recientes han demostrado que la topografía puede intensificar la lluvia al forzar el ascenso del aire húmedo, pero también puede generar zonas de sombra pluviométrica en laderas opuestas al flujo predominante. Otros estudios muestran cómo la presencia de montañas en el noreste de Brasil modifica

la posición, intensidad y distribución de los sistemas de precipitación a escala regional [12]. Estos hallazgos coinciden con estudios que muestran cómo el relieve puede cambiar la forma en que se distribuye la lluvia y cómo se presentan los eventos intensos, algo muy importante en zonas con montañas como la cuenca del río Piura [13]. Sin embargo, entender estos patrones sigue siendo difícil porque gran parte de la cuenca no cuenta con suficientes estaciones meteorológicas con registros amplios y bien ubicados, lo que limita la posibilidad de anticipar lluvias extremas y afecta la creación de alertas tempranas confiables [14]. Por ello, se usan productos de precipitación obtenidos por satélite, como ERA5-Land, CHIRPS o PISCOp v2.1, que ayudan a complementar la falta de datos. Aun así, estos productos pueden mostrar errores en áreas con topografía compleja o microclimas muy variables, como se ha observado en investigaciones realizadas en los Andes del norte del Perú [15]. Debido a esto, es necesario evaluarlos de manera local antes de utilizarlos. En este contexto, RAIN4PE, un producto corregido con estaciones reales del SENAMHI y de resolución intermedia, ofrece una alternativa consistente a escala regional para estudiar la precipitación en la cuenca del río Piura, motivo por el cual fue utilizado en esta investigación enfocada en patrones espaciales y relaciones climáticas de gran escala.

II. OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN

El objetivo de esta investigación fue analizar la relación entre la precipitación mensual de RAIN4PE y los valores mensuales de la temperatura superficial del mar (TSM) en las regiones Niño 1+2, 3, 3.4 y 4, con el fin de identificar los sectores que presentan mayor asociación lineal entre estas variables mediante el coeficiente de determinación obtenido a partir de una regresión lineal en varios puntos dentro de la cuenca del río Piura.

III. HERRAMIENTAS

Para el desarrollo de la investigación se emplearon herramientas de procesamiento geoespacial y análisis estadístico que permitieron evaluar la relación entre el TSM en la región Niño 1+2, 3, 3.4 y 4 y la precipitación estimada por RAIN4PE en la cuenca del río Piura.

1. Zona de Estudio

La zona de estudio corresponde a la cuenca del río Piura, ubicada en el norte del Perú; tiene un área de 10872.1 km², una longitud de cauce principal de aproximadamente 243 km, una altitud promedio de 464.9 m.s.n.m. y una pendiente media de 9.22 %. Se encuentra entre la cuenca Chira al norte y otras cuencas al este y sur y abarca principalmente la región de Piura. [16].

En las figuras 3, 4 y 5 se muestran mapas con las estaciones pluviométricas, pendientes y altitudes dentro de la cuenca.

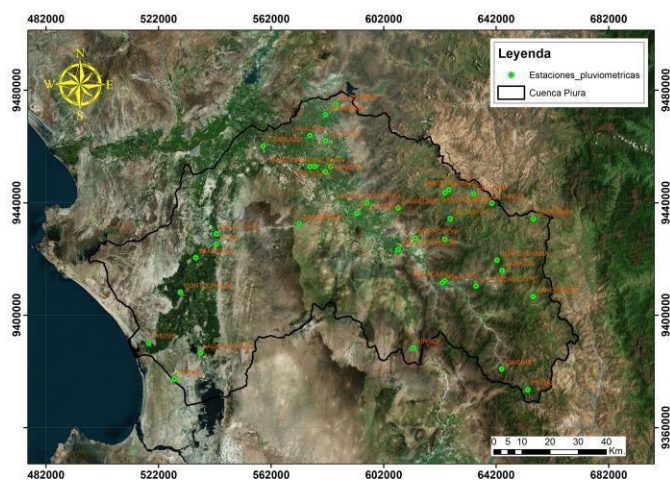


Fig.3 Mapa de las estaciones dentro de la cuenca del río Piura

En el mapa se aprecia que la mayor parte del terreno cercano a la zona costera es predominantemente plana; sin embargo, hacia la región andina se presentan pendientes muy pronunciadas, con valores que alcanzan hasta 77.10°. Esta marcada variación topográfica evidencia una orografía altamente accidentada, lo que podría incrementar el nivel de peligrosidad en dichas áreas debido a la inestabilidad asociada a fuertes pendientes. Además, estas zonas empinadas suelen estar más expuestas a procesos erosivos intensos y a una mayor escorrentía superficial durante eventos de lluvia moderada o extrema, lo que aumenta la probabilidad de deslizamientos, derrumbes y flujos de detritos. Del mismo modo, la combinación de altitud, pendiente y variabilidad climática propia de los Andes puede generar condiciones hidrometeorológicas más severas, favoreciendo la ocurrencia de eventos extremos que impactan directamente la estabilidad del terreno y la seguridad de las poblaciones cercanas.

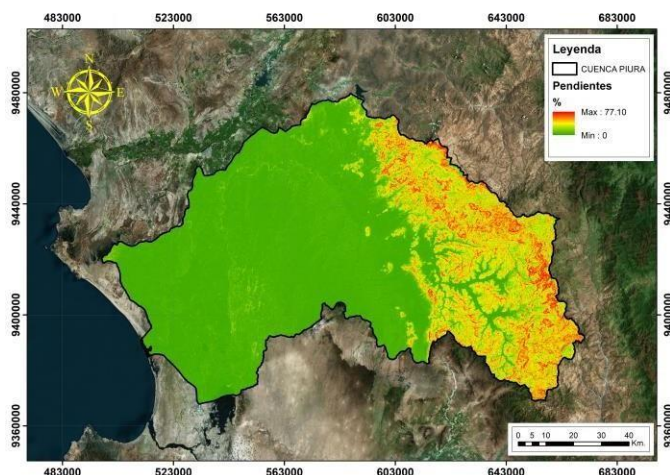


Fig.4 Mapa de pendientes de la cuenca del río Piura

En el mapa se aprecia que la mayor parte del terreno cercano a la zona costera es predominantemente plana; sin embargo, hacia la región andina se presentan pendientes muy pronunciadas, con

valores que alcanzan hasta 77.10%. Esta marcada variación topográfica evidencia una orografía altamente accidentada, lo que podría incrementar el nivel de peligrosidad en dichas áreas debido a la inestabilidad asociada a fuertes pendientes.

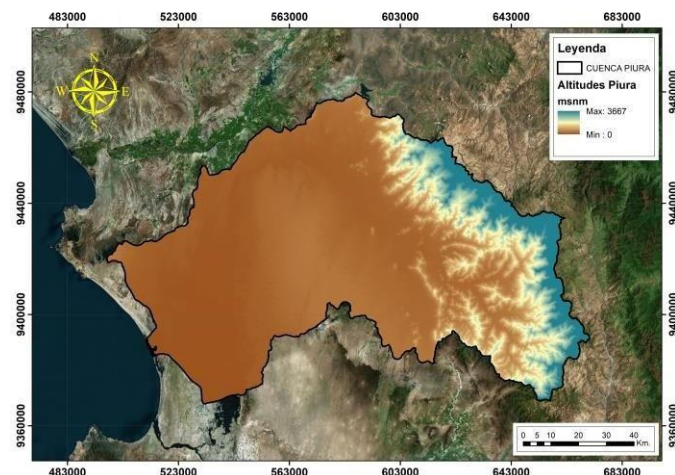


Fig.5 Mapa de altitudes de la cuenca del río Piura

En el último mapa presentado se observa que, como era de esperarse, las zonas de mayor altitud coinciden con las pendientes más elevadas. Esta combinación entre altitudes pronunciadas y fuertes gradientes topográficos incrementa significativamente la susceptibilidad a procesos de inestabilidad geomorfológica, como derrumbes, deslizamientos y caídas de roca. Además, en estas áreas altas suelen presentarse condiciones climáticas más extremas, incluyendo mayores índices de precipitación orográfica, variaciones térmicas marcadas y eventos de lluvia intensa, los cuales pueden actuar como detonantes adicionales de movimientos en masa. Por lo tanto, la interacción entre altitud, pendiente y clima convierte a estas zonas en sectores de riesgo elevado dentro de la cuenca.

2. Google Earth Engine (GEE)

Es una plataforma de análisis geoespacial en la nube que permite acceder y procesar productos de lluvia satelital, como CHIRPS, GPM o ERA5, sin necesidad de descargarlos manualmente. A través de scripts en JavaScript, es posible visualizar, analizar y extraer series temporales de precipitación de manera rápida y eficiente, convirtiendo a GEE en una herramienta clave para estudios hidrológicos y climáticos [17].

3. Producto grillado de precipitación RAIN4PE

RAIN4PE es un producto grillado de precipitación desarrollado específicamente para el Perú, elaborado a partir de información satelital combinada con técnicas de corrección y calibración utilizando estaciones pluviométricas locales. Su nombre proviene de Rainfall for Peru, y ofrece datos de precipitación con resolución intermedia espacial (10 km²), lo que lo convierte en una herramienta útil para estudios hidrológicos, análisis climáticos, monitoreo de eventos extremos y evaluación de la variabilidad de la lluvia en regiones donde la red de estaciones

es limitada [18]. Existen otros productos grillados de precipitación, como ERA5-Land, CHIRPS y PISCOp v2.1, que también fueron evaluados en esta investigación. No obstante, se seleccionó finalmente el producto grillado RAIN4PE, debido a que presentó el mayor coeficiente de determinación (R^2) en la comparación entre los valores mensuales observados en las estaciones pluviométricas y los estimados por cada producto. En la figura 6 se muestra el diagrama de flujo del producto grillado RAIN4PE.

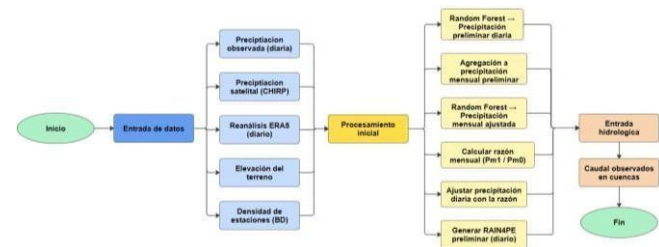


Fig.6 Diagrama de flujo del algoritmo de RAIN4PE

4. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI)

Es la institución encargada de monitorear y analizar las condiciones meteorológicas, climáticas e hidrológicas del país. Administra la red de estaciones y genera pronósticos, alertas y productos climáticos oficiales. Su información es fundamental para la gestión de riesgos, estudios ambientales y la toma de decisiones en diversos sectores [19].

A partir de los registros oficiales proporcionados por esta institución, se obtuvo la serie histórica correspondiente a las estaciones pluviométricas empleadas en la investigación.

En la figura 7 se muestra la serie histórica de la estación Hacienda Bigote, ubicada en el sector alto andino de la cuenca del río Piura. Se observa una marcada variabilidad interanual, con picos de precipitación asociados principalmente a eventos intensos durante las temporadas lluviosas.

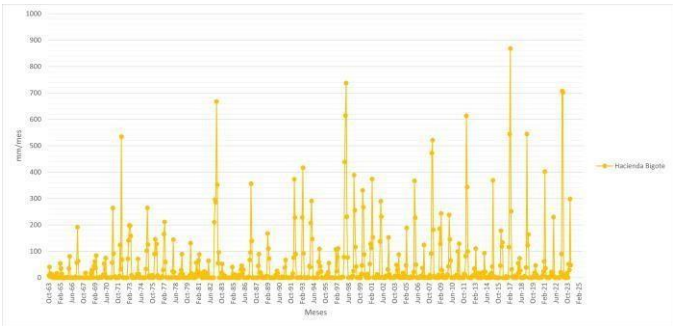


Fig.7 Serie histórica de la estación Hacienda Bigote

A continuación, en la figura 8 presenta la serie histórica de la estación Huarmaca, ubicada hacia el extremo oriental de la parte alta de la cuenca. Su comportamiento mantiene la variabilidad observada en Hacienda Bigote, aunque con picos de precipitación más frecuentes, permitiendo comparar la respuesta pluviométrica dentro del mismo entorno geográfico.

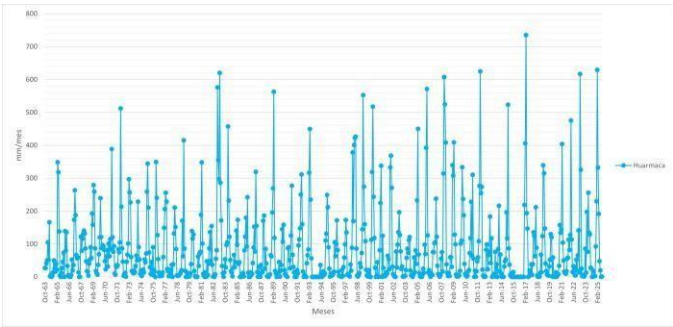


Fig.8 Serie histórica de la estación Huarmaca

Finalmente, la figura 9 muestra la serie histórica de la estación San Pedro, ubicada en la parte media-alta de la cuenca, ligeramente desplazada hacia el sector oriental. Su registro conserva la dinámica identificada en las estaciones anteriores, con eventos de lluvia significativos distribuidos a lo largo del tiempo.

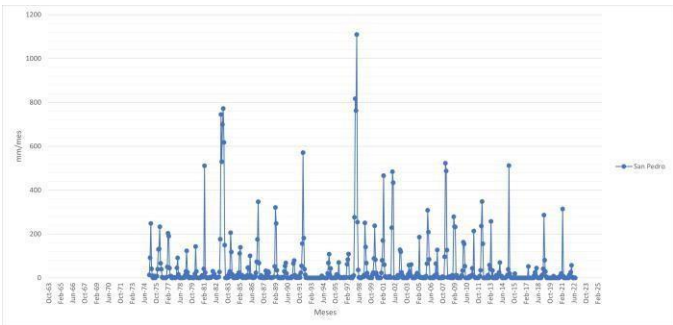


Fig.9 Serie histórica de la estación San Pedro

5. Temperatura Superficial del Mar (TSM)

La Temperatura Superficial del Mar (TSM) es la temperatura registrada en la capa más superficial del océano, generalmente en los primeros milímetros o centímetros del agua, y constituye una variable clave para el estudio del clima debido a su influencia en la formación de nubes, la circulación atmosférica y fenómenos como El Niño y La Niña. En este contexto, las regiones Niño 1+2, 3, 3.4 y 4 corresponden a zonas específicas del océano Pacífico ecuatorial que se emplean para monitorear y analizar el fenómeno El Niño–Oscilación del Sur (ENOS), cada una delimitada geográficamente y con un aporte particular para comprender la dinámica oceánica y su impacto en el clima regional y global. En la figura 10 se ve la división de las regiones [20].

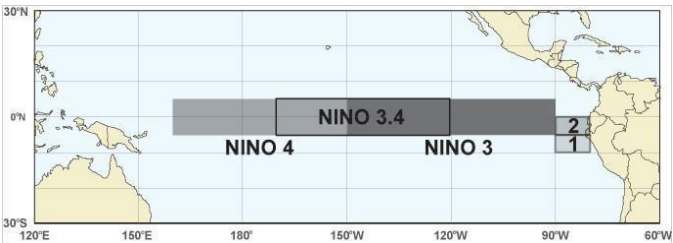


Fig.10. Ubicación de la región Niño 1+2, 3, 3.4 y 4

6. Coeficiente de determinación (R^2)

El coeficiente de determinación (R^2) es una medida estadística que indica qué porcentaje de la variabilidad de una variable dependiente (por ejemplo, la precipitación) puede ser explicada por una variable independiente (por ejemplo, la TSM) [21]. En la tabla 1 se puede ver la clasificación de los rangos de R^2 .

Tabla.1 Clasificación de valores según el criterio de R^2

Clasificación de valores según el criterio de R^2	
E	Ajuste
<0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 – 0.8	Muy bueno

Esta clasificación resultó fundamental a lo largo de todo el proceso de investigación, ya que permitió evaluar el grado de ajuste lineal entre variables y comparar el desempeño relativo de los productos analizados. Asimismo, facilitó la selección de los productos y herramientas más adecuados, garantizando que los resultados obtenidos fueran técnicamente sólidos y respaldados por evidencia cuantitativa.

7. ArcGIS

ArcGIS, desarrollado por ESRI, es un SIG que permite visualizar, analizar y gestionar datos espaciales. Facilita la creación de mapas, modelos espaciales y análisis territoriales, siendo ampliamente usado en hidrología, planificación y estudios climáticos [22].

IV. METODOLOGÍA

El proceso inicia con la selección de la cuenca de análisis y la recopilación de información disponible; si no se cuenta con datos suficientes, se solicita la información de estaciones al SENAMHI. Cuando la información inicial existe, se reúnen los registros de precipitación mensual provenientes de estaciones pluviométricas y productos grillados de satélite, verificando si el registro es adecuado en espacio y tiempo; de no serlo, se evalúan y seleccionan los productos grillados más apropiados. Posteriormente, los datos grillados se organizan en tablas con sus coordenadas y se elaboran listas que permiten relacionar la información de estaciones con la de los productos interpolados. Luego se evalúa la relación entre ambas variables mediante el coeficiente de determinación (R^2); si los valores de R^2 son bajos se descartan productos, y si son aceptables se continua con los mejores. Paralelamente, se descargaron los datos mensuales de las temperaturas superficiales del mar (TSM) para las regiones Niño 1+2, 3, 3.4 y 4 a partir del producto Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST) del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), relacionando estos valores con los datos de precipitación grillada en cada punto de la cuenca. Para cada combinación se calculan métricas estadísticas como R^2 cuyos resultados permiten evaluar la relación precipitación–

TSM. Finalmente, se generan mapas en SIG que representan la distribución espacial de estos indicadores y se elaboran las conclusiones y recomendaciones del estudio, dando por finalizado el proceso. En la figura 11 se puede apreciar el flujograma de trabajo.

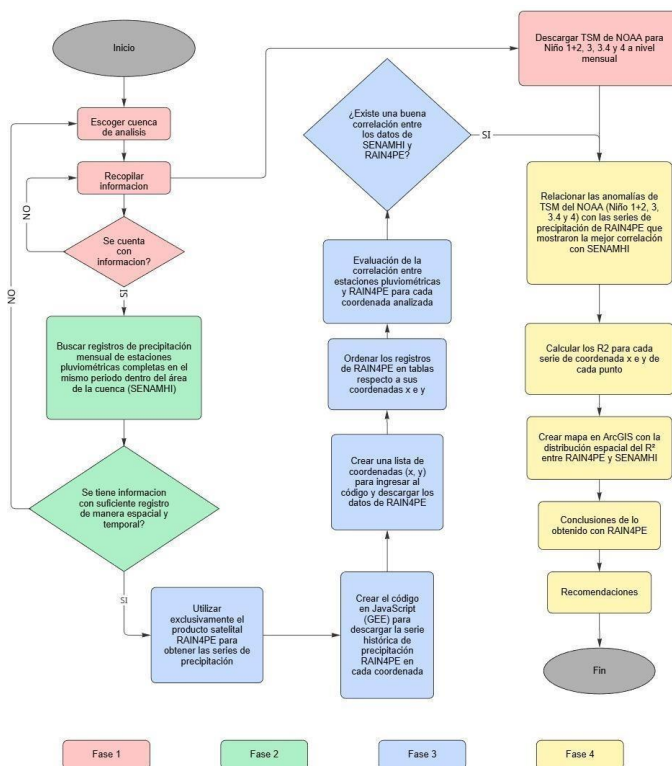


Fig.11 Flujograma del trabajo de investigación

FASE 1

A. Delimitación de la cuenca y recopilación de información

En esta fase se define la cuenca hidrográfica de estudio, estableciendo sus límites espaciales como base para el análisis hidrometeorológico. Posteriormente, se recopila la información disponible relacionada con la precipitación y variables climáticas, evaluando la disponibilidad, continuidad y calidad de los datos necesarios para el desarrollo del estudio. Esta etapa permite determinar si la información existente es suficiente para realizar el análisis o si es necesario recurrir a fuentes alternativas de datos.

FASE 2

B. Selección y validación de registros de precipitación observados

Se identifican y seleccionan las estaciones pluviométricas del SENAMHI ubicadas dentro del área de la cuenca que cuenten con registros mensuales de precipitación completos y continuos para un mismo periodo de análisis. Los datos seleccionados son evaluados en términos de su cobertura espacial y temporal, con el fin de asegurar su representatividad y confiabilidad. Esta fase establece la base observacional que servirá como referencia para la validación del producto satelital.

FASE 3

C. Obtención y procesamiento del producto satelital RAIN4PE
En esta fase se utiliza el producto satelital RAIN4PE para la obtención de series históricas mensuales de precipitación. Se elabora una lista de coordenadas (x, y) correspondientes a los puntos de análisis y se desarrolla código en JavaScript en Google Earth Engine para la descarga automatizada de los datos. Posteriormente, las series de precipitación satelital se organizan en tablas según su ubicación geográfica y se realiza la evaluación del coeficiente de determinación entre los datos de RAIN4PE y los registros observados del SENAMHI para cada coordenada analizada, identificando las zonas con mejor desempeño del producto.

FASE 4

D. Análisis estadístico, relación con valores mensuales de TSM y representación espacial de resultados
Las series de precipitación de RAIN4PE que presenten el mejor R^2 con los registros del SENAMHI se relacionan con los datos mensuales de temperatura superficial del mar (TSM) del NOAA para las regiones Niño 1+2, 3, 3.4 y 4. Se calculan los coeficientes de determinación (R^2) para cada punto de análisis, permitiendo cuantificar la relación entre la precipitación y las condiciones oceánicas. Finalmente, los resultados se representan espacialmente mediante mapas elaborados en ArcGIS, a partir de los cuales se interpretan los patrones observados y se formulan las conclusiones y recomendaciones del estudio.

V. RESULTADOS

Se descargaron desde el NOAA los registros mensuales de temperatura superficial del mar correspondientes a las diferentes regiones del ENSO para el periodo 1981–2015. Asimismo, se creó un código en JavaScript para Google Earth Engine (GEE) que permitió descargar, para las mismas fechas de los datos del NOAA, un archivo CSV con los registros diarios los cuales fueron posteriormente agregados a escala mensual mediante acumulación mensual del producto RAIN4PE en 168 puntos seleccionados dentro de la cuenca, distribuidos con una separación espacial aproximada de 10 km. La selección de 168 puntos responde a un equilibrio entre resolución espacial y representatividad, permitiendo una adecuada cobertura de la cuenca sin generar redundancia ni aumentar innecesariamente el costo computacional. Un número menor limitaría la representación de la variabilidad espacial de la precipitación, mientras que uno mayor no aportaría mejoras significativas, considerando la resolución del producto RAIN4PE. Además, se ubicaron estaciones meteorológicas dentro de la cuenca del río Piura que cuentan con registros pluviométricos en el periodo común de análisis y que disponen de series históricas de datos suficientemente largas. Para complementar los resultados que se presentarán, en la tabla 2 se mostrará porque se determinó que el estudio se realizará con el producto grillado de precipitación RAIN4PE.

Tabla.2 Valores de coeficiente de determinación de R^2 entre las precipitaciones registradas de las estaciones y diferentes productos grillados

Estaciones pluviométricas	Producto grillado de precipitación			
	ERA5Land	CHIRPS	RAIN4PE	PISCOp v2.1
San Pedro	0.6321	0.3172	0.8776	0.7700
Morropón	0.4866	0.5180	0.7020	0.5687
Hacienda Bigote	0.3753	0.6243	0.8662	0.9503
Huamarca	0.6743	0.6505	0.8712	0.8330
Santo Domingo	0.4937	0.5421	0.4106	0.3614

Se observa que el producto grillado de precipitación RAIN4PE presenta los mayores valores de coeficiente de determinación con los registros pluviométricos locales en comparación con los demás productos analizados. Si bien algunos productos muestran resultados superiores en zonas específicas, estos no son consistentes a escala de toda la cuenca. En términos generales, RAIN4PE exhibe los valores más altos de R^2 en relación con las pocas estaciones pluviométricas disponibles dentro de la cuenca. Esta mayor concordancia constituyó el criterio principal para su selección como la alternativa que mostró un desempeño favorable frente a las estaciones analizadas.

Al ya haber determinado el producto se continuó con el proceso de la investigación que ya se ha explicado anteriormente.

En la figura 12 se puede apreciar el entorno de GEE que mediante el código menciono nos permitió descargar los datos de RAIN4PE.

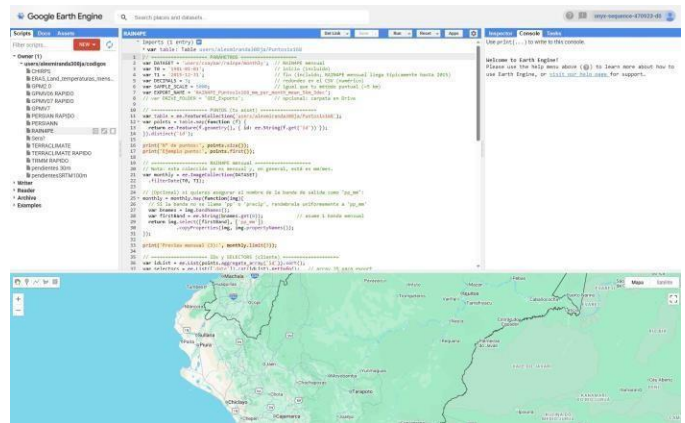


Fig.12. Código para extraer larga data dentro de GEE

Antes de utilizar el producto grillado RAIN4PE, es necesario realizar una validación con las estaciones pluviométricas ubicadas dentro de la cuenca, con el fin de determinar si dicho producto constituye una alternativa válida para la zona de estudio. En la figura 13 se presentan los valores obtenidos

entre los datos de RAIN4PE en el mismo punto de coordenadas y los registros de las estaciones pluviométricas, lo que permite evaluar el desempeño del producto frente a mediciones observadas.

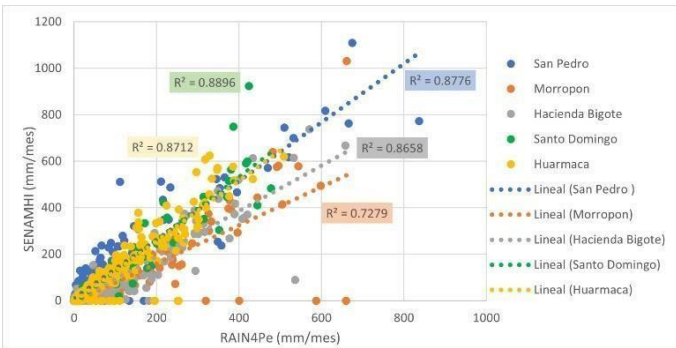


Fig.13. Gráfica comparativa entre estaciones pluviométricas y RAIN4PE

Una vez validada la información, se observó que los R^2 entre los datos de lluvia observados en terreno y el producto grillado RAIN4PE oscilan entre 0.41 y 0.88. Estos valores indican un desempeño que varía de bueno a muy bueno según los criterios de evaluación estadística adoptados, lo que sugiere que el producto reproduce de manera consistente los patrones de precipitación en la zona de estudio. Por lo tanto, se puede concluir que grillado RAIN4PE es un recurso válido para aplicaciones hidrológicas y estudios climáticos en esta cuenca.

Después de ello se realizaron regresiones lineales entre los puntos centrales de cada celda del producto RAIN4PE, correspondientes a los 168 puntos ubicados dentro y en zonas cercanas de la cuenca del río Piura. Con estos datos se evaluaron los valores de R^2 entre todos los puntos y las temperaturas promedio mensuales del ENSO, junto con los puntos mencionados anteriormente. El análisis se inició utilizando los registros mensuales de temperatura de la región Niño 1+2. En la figura 14, 15, 16 y 17 se muestran los resultados obtenidos.

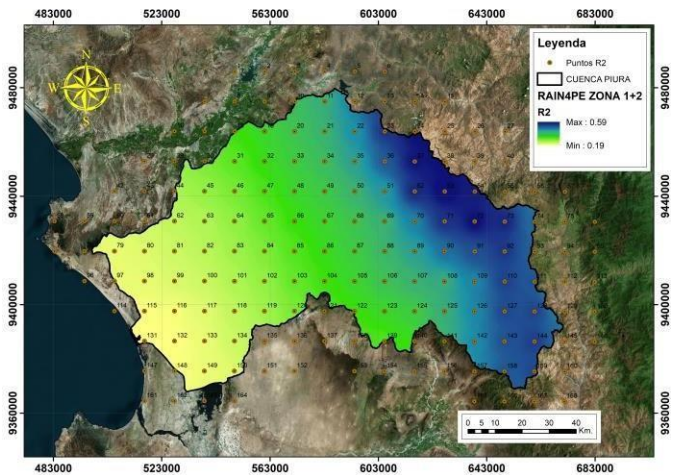


Fig.14. Mapa de coeficiente de determinación R^2 Niño 1+2 con RAIN4PE

Como se observa en la figura 14, la relación entre producto grillado RAIN4PE con la región 1+2, la más cercana a la zona de estudio, alcanza un coeficiente de determinación máximo de 0.59, lo que indica un desempeño bueno. No obstante, los valores de R^2 presentan variaciones significativas dentro de la cuenca. Los valores más altos se registran en las áreas próximas a la Cordillera de los Andes, mientras que en las zonas costeras disminuyen hasta 0.19. El mapa muestra una clara tendencia altitudinal: las áreas de mayor elevación, ubicadas al este de la cuenca, presentan colores que van del verde al azul, reflejando una mejor concordancia entre el producto grillado y las observaciones de terreno. Por el contrario, en las zonas bajas, especialmente cerca de la costa, los valores de R^2 (representados en tonos amarillos) son menores, lo que sugiere una menor capacidad del producto grillado para representar con precisión las precipitaciones en estas áreas.

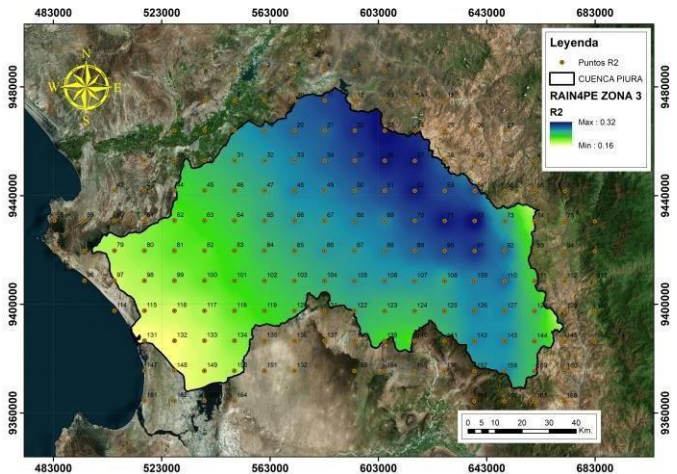


Fig.15. Mapa de coeficiente de determinación R^2 Niño 3 con RAIN4PE

Al igual que en la figura anterior, se aprecia la distribución espacial de los coeficientes de determinación a lo largo de toda la zona de estudio. En este caso, los valores más altos disminuyen hasta 0.32 en la franja cercana a los Andes, mientras que hacia la zona costera los valores de R^2 se reducen notablemente hasta alrededor de 0.16. Esta disminución es consistente con el alejamiento de la región donde se origina la señal climática, lo que atenúa la relación entre las variables analizadas. Aunque la altitud y la orografía continúan influyendo en la variabilidad espacial, su efecto no se manifiesta con la misma claridad que en la región previamente evaluada.

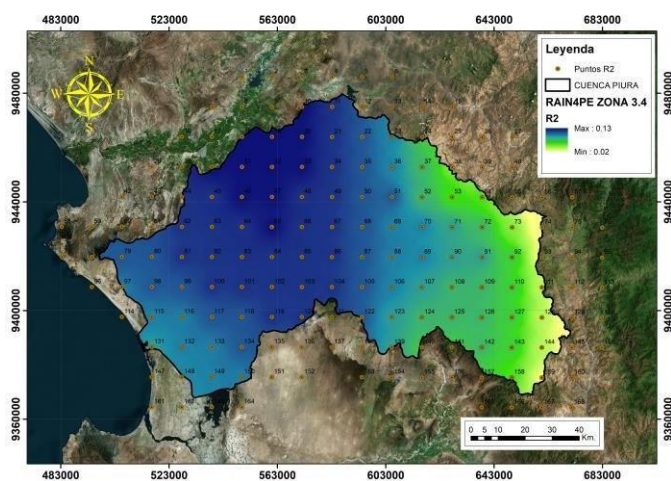


Fig.16 Mapa de coeficiente de determinación R^2 Niño 3.4 con RAIN4PE

En este caso, la distribución espacial del coeficiente de determinación muestra valores aún más reducidos en comparación con la figura anterior. Los sectores cercanos a la costa presentan los niveles más bajos, alcanzando aproximadamente entre 0.01 y 0.02, lo que evidencia una relación muy débil con la señal oceánica. Hacia el extremo oriental, próximo a la zona andina, los valores incrementan ligeramente hasta alrededor de 0.13, aunque continúan siendo bajos dentro del conjunto de análisis. Este comportamiento indica que, al ampliar el ámbito espacial, la influencia de la señal climática disminuye y factores locales como la variabilidad atmosférica y la complejidad topográfica adquieren mayor peso, atenuando la relación observada entre las variables.

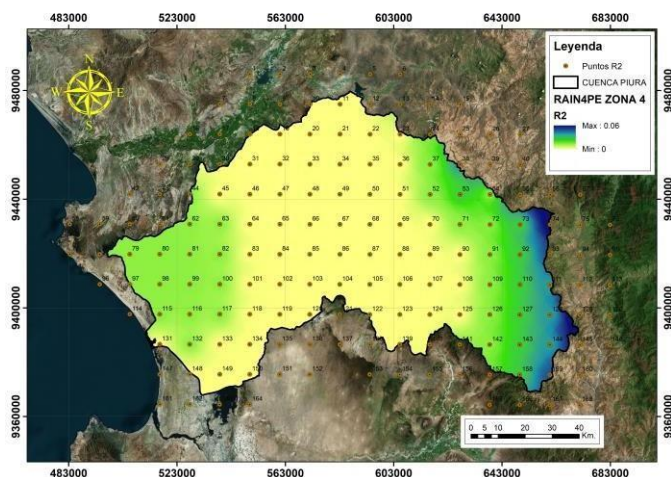


Fig.17. Mapa de coeficiente de determinación R^2 Niño 4 con RAIN4PE

En esta representación, la distribución del coeficiente de determinación evidencia valores notablemente más bajos y homogéneos en comparación con las zonas anteriores. La mayor parte de la cuenca presenta valores de R^2 muy reducidos, en el orden de 0 a 0.01, lo que confirma una relación mínima entre la precipitación y la señal oceánica en esta región. Únicamente en el extremo oriental, próximo al límite andino, se

observan ligeros incrementos que alcanzan valores cercanos a 0,06 aunque continúan siendo modestos dentro del conjunto general. Este patrón sugiere que, al desplazarse hacia áreas más distantes de la influencia directa del Pacífico, la variabilidad local y los procesos atmosféricos internos predominan sobre la señal forzada, debilitando aún más la asociación espacial en toda la cuenca.

En la tabla 3 se muestran los porcentajes asociados a cada rango de R^2 obtenidos al relacionar las precipitaciones con el TSM de las regiones Niño 1+2, Niño 3, Niño 3.4 y Niño 4.

Tabla.3. Porcentaje de rangos de coeficiente de determinación (R^2) por región Niño en la cuenca del río Piura

Región	Porcentaje de cada rango R^2 dentro de la cuenca del Río Piura con RAIN4PE		
	<i>Insuficiente</i>	<i>Satisfactorio</i>	<i>Bueno</i>
Niño 1+2	0.47%	63.69%	35.84%
Niño 3	13.67%	86.33%	
Niño 3.4	100.00%		
Niño 4	100.00%		

Los resultados indican que los porcentajes más altos de R^2 se concentran en las zonas más cercanas a la cuenca, mientras que, conforme se analizan sectores más alejados, los porcentajes de R^2 se desplazan hacia rangos considerablemente menores. Esto sugiere que la influencia oceánica se va debilitando progresivamente a medida que las regiones se ubican más lejos del Pacífico oriental, reflejándose en una menor capacidad de la TSM para explicar la variabilidad de las precipitaciones en áreas distantes.

VI. LIMITACIONES

Unas de las limitaciones de la investigación es que la cuenca del río Piura, al igual que gran parte del territorio peruano, presenta una distribución espacial limitada e insuficiente de estaciones meteorológicas. En lugar de estar ubicadas estratégicamente para capturar la variabilidad espacial y temporal de la precipitación, muchas estaciones se encuentran agrupadas en zonas accesibles o urbanas, dejando extensas áreas (especialmente en sectores altoandinos y de difícil acceso) sin cobertura representativa. Esta mala distribución limita la validación precisa del producto grillado, reduce la calidad de los análisis y obliga a depender de datos satelitales para cubrir vacíos significativos de información. Asimismo, la falta de inversión sostenida en infraestructura de monitoreo climático en el Perú continúa restringiendo la capacidad del país para generar registros completos y anticipar con mayor precisión los eventos hidrometeorológicos que afectan a regiones vulnerables como la cuenca del río Piura.

VII. CONCLUSIONES

Los resultados muestran que el TSM presenta una marcada asociación con la precipitación de la cuenca del río Piura únicamente a través de la región Niño 1+2, donde se alcanzan valores de R^2 de hasta 0.59, mientras que las regiones 3, 3.4 y 4 presentan resultados ubicados en rangos considerablemente más bajos, lo que indica una relación débil debido a su mayor distancia y menor influencia directa sobre el Pacífico oriental cercano al Perú. Asimismo, se evidencia un marcado control orográfico: estos valores se incrementan hacia las zonas altas próximas a los Andes y disminuyen en el sector costero, lo que confirma que la elevación modula fuertemente la respuesta pluvial frente a las temperaturas oceánicas. La validación previa del producto RAIN4PE, con coeficientes de determinación entre 0.41 y 0.88 frente a estaciones pluviométricas, respalda el uso del producto en el presente estudio. Finalmente, los resultados muestran que la variabilidad de la precipitación en la cuenca está asociada principalmente a la región Niño 1+2, mientras que las diferencias espaciales observadas responden al carácter naturalmente complejo del sistema atmosférico que controla la precipitación. En conjunto, los resultados confirman la influencia dominante de TSM cercana a la costa y la cantidad de precipitación en las partes altas de la cuenca, lo que refleja la interacción de los distintos procesos climáticos que actúan en la región.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su profundo agradecimiento a sus asesores, Abel Carmona Arteaga, Leonardo Franco Castillo Navarro y Franz Leonardo Pucha Cofrep por su guía constante, su claridad para orientar las ideas y su dedicación para fortalecer cada etapa del estudio. Sus aportes fueron esenciales para convertir este trabajo en un esfuerzo académico sólido y bien encaminado.

Del mismo modo, se agradece a la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas por brindar el espacio formativo donde surgió, creció y tomó forma esta investigación. Su compromiso con la formación profesional permitió que este proyecto se desarrollara en un entorno que fomenta el análisis crítico, la curiosidad científica y el rigor académico.

REFERENCIAS

- [1] Frank, J., Smith, R., & Hamilton, P., "Evaluation of precipitation performance in ERA5-Land using station data in the Canadian Prairies," *Journal of Hydrometeorology*, vol. 23, pp. 1–15, 2022.
- [2] Cabrera, M., López, R., & Valverde, A., "Impact of mesoscale sea-surface temperature anomalies on continental rainfall using a coupled coastal model," *Climate Dynamics*, vol. 55, pp. 1123–1140, 2025.
- [3] Mun, S., Park, J., & Lee, H., "Influence of recent SST warming patterns on the 2020 extreme East Asian monsoon," *Climate Dynamics*, vol. 63, pp. 2441–2459, 2024.
- [4] Kayano, M., Andreoli, R., & Souza, R., "Seasonal impacts of ENSO on South American rainfall variability," *International Journal of Climatology*, vol. 42, pp. 389–405, 2022.
- [5] Farias de Reyes, P., Torres, D., & Córdova, J., "Historical analysis of extreme rainfall events in the Piura River Basin from 1950 to present," *Hydrological Sciences Journal*, vol. 70, pp. 144–160, 2024.
- [6] Diaz, M., Huamán, J., & Ortega, J., "Influence of gauge density and elevation on CHIRPS rainfall accuracy in the Peruvian Andes," *Atmospheric Research*, vol. 290, pp. 106–118, 2024.
- [7] Xie, T., & Zhang, F., "Three-dimensional anisotropic orographic drag and its effect on East Asian rainfall patterns," *Journal of Climate*, vol. 38, pp. 501–520, 2025.
- [8] Mazzoglio, P., Costa, A., & Rossi, M., "Local regression modelling of extreme sub-daily precipitation and elevation gradients in complex terrain," *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 27, pp. 377–395, 2023.
- [9] Mongabay Latam, "Inundaciones en Piura por El Niño Costero", *Mongabay Latam*, 14 marzo 2017. <https://es.mongabay.com/2017/03/peru-rios-inundacion-nino-costero-piura/>
- [10] El Regional Piura, "Inundación de Piura: conoce en más detalle la desgracia de damnificados por el río Piura", *El Regional Piura*, 10 abril 2017, <https://elregionalpiura.com.pe/especiales/163-reportajes/19987-inundacion-de-piura-el-peru-conoce-en-mas-detalle-la-desgracia-de-damnificados-por-el-rio-piura>
- [11] Tsai, Y., Kim, S., & Jung, C., "Atmospheric precursors and dynamical controls of orographic rainfall in Korean mountain ranges," *Environmental Research Letters*, vol. 20, pp. 1–14, 2025.
- [12] Félix, R., Monteiro, A., & Silva, D., "Orographic modulation of rainfall and regional circulation patterns in northeastern Brazil," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 130, pp. 220–238, 2025.
- [13] Di Leo, N., Barbona, I., Beltrán, C., Forgioni, F. P., Coronel, A., & Jozami, E., "Temporal variability of spatial patterns of correlations between summer rainfall and the Oceanic Niño Index in the Pampean region," *Science of the Total Environment*, vol. 955, 2024.
- [14] Vega, J., Barco, J., & Hidalgo, C., "Space-time analysis of the relationship between landslides occurrence, rainfall variability and ENSO in the Tropical Andean Mountain region in Colombia," *Landslides*, vol. 21, no. 6, pp. 1293–1314, 2024.
- [15] Xie, Y., Liu, S., Fang, H., Ding, M., & Liu, D., "Precipitation concentration in a Chinese region and its relationship with teleconnection indices," *Journal of Hydrology*, vol. 612, 2022.
- [16] A. Velasco y J. E. Capilla, "Hydrogeological characterization and assessment of anthropic impacts in the Lower Piura Sub-basin Aquifer in Peru," *Hydrogeology Journal*, vol. 27, pp. 2755–2773, 2019. doi: 10.1007/s10040-019-02027-7.
- [17] N. Gorelick, M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, and R. Moore, "Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone," *Remote Sensing of Environment*, vol. 202, pp. 18–27, 2017.
- [18] C. A. Fernandez-Palomino, F. F. Hattermann, V. Krysanova, A. Lobanova, F. Vega-Jácome, W. Lavado, W. Santini, C. Aybar, and A. Bronstert, "A novel high-resolution gridded precipitation dataset for Peruvian and Ecuadorian watersheds: Development and hydrological evaluation," *Journal of Hydrometeorology*, vol. 23, no. 3, pp. 309–336, 2022.
- [19] Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), *Datos de precipitación de estaciones meteorológicas del Perú*. Lima, Perú, 2024. Disponible en: <https://www.senamhi.gob.pe>
- [20] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), *Sea Surface Temperature and ENSO Monitoring: Niño Regions Definitions and Data*. NOAA Climate Prediction Center, 2024. Disponible en: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov>
- [21] A. Carmona, D. Sarango, y M. García, "Generación de precipitaciones y caudales de máximas avenidas para las cuencas del río Biabo," *Revista de Investigación de Física*, vol. 24, no. 3, 2021. doi: 10.15381/rif.v24i3.20920.
- [22] Kumar, A., & Singh, R. (2024). Applications of ArcGIS for spatial analysis and environmental management: A review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(7).